腾格里沙漠宁夏回族自治区中卫市沙层水分入渗研究

赵景波[1,2], 马延东[1], 邢 闪[1], 董治宝[1,3]
(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062; 2. 中国科学院 地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710075; 3. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 为查明腾格里沙丘沙层水分渗透性及其原因,在该地区进行了沙层水分入渗试验。结果表明,在稳定前,流动沙丘入渗率最大,半固定沙丘次之,洼地最小。在达到稳定入渗后,半固定沙丘的入渗率较流动沙丘略大,洼地则最小,它们的平均稳定入渗率分别为 16.8, 16.2, 12.0 mm/min。不同地貌类型的沙层达到稳定入渗的时间在 6.3~ 8.8 min 之间。流动沙丘与半固定沙丘水分入渗量基本相同,入渗量均较大,洼地入渗量最小。沙层具有入渗率高,达到稳定入渗快和入渗率变化小的突出特点,沙层粒度较粗,组成均一和孔隙连通性好,是其主要原因。沙层入渗率高为沙漠地区大气降水向地下水的转化创造了非常有力的条件。研究结果表明,在常用的 3 个入渗计算公式中, Koctakob 公式最适用于沙丘水分的入渗研究, Horton 公式也较适用沙层水分的入渗研究,通用经验公式不适于沙层水分的入渗研究。

关键词: 腾格里沙漠; 水分入渗; 累积入渗量; 入渗率
文献标识码: A 文章编号: 1000-288X(2011)03-0012-05 中图分类号: P641.2, P941.73

Sand Layer Water Permeability of Tengger Desert in Zhongwei City, Ningxia Hui Autonomous Region

ZHAO Jing-bo[1,2], MA Yan-dong[1], XING Shan[1], DONG Zhi-bao[1,3]
(1. *College of Tourism and Environment Science, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi* 710062, *China*; 2. *State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi* 710075, *China*; 3. *Key Laboratory of Desert and Desertification, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu* 730000, *China*)

Abstract: In order to explore the water permeability of sand layer and its controlling factors in the Tengger Desert, an infiltration experiment was carried out in the region. The results show that during the first stage before a steady infiltration rate was reached, the moving sand dunes have the highest starting infiltration rate, followed by the half-fixed sand dunes and low-lying-lands in order. After about 6.3~ 8.8 min, the infiltration rate of sand layers became stable. The saturated infiltration rate of half-fixed sand dune was slightly larger than that of the moving sand dune, while the rate of the low-lying-land remained the smallest. The moving sand dune and the half-fixed sand dune had almost same high infiltration capacities and the low-lying-land has the smallest infiltration capacity. As typical characteristics, the sand layers had high and steady infiltration rates and need only a short period from start to approch steady infiltration rates, owing to the coarse but uniform texture and good pore connectivity. The high infiltration rates provided very good conditions for the transformation from rainfalls to groundwater. For the three infiltration models, the Koctakob formula was the best in describing the water permeability of sand layers, the Horton formula the second, and the general formula the most unfavourable.

Keywords: Tengger Desert; water infiltration; cumulative infiltration; infiltration rate

沙漠地区是一种特殊的地理环境区,研究沙层渗透性对认识沙层水分来源和水分运移有重要意义。目前国内对沙漠水分入渗特征的研究相对较少[1-4]。前人对腾格里沙漠东南缘进行的研究认为土壤累积入渗量与入渗深度均随土壤初始含水率的增大而递减,固定沙丘区降水强度与土壤入渗速率之间存在线

收稿日期: 2010-10-28 修回日期: 2010-12-01
资助项目: 教育部长江学者特聘教授基金项目"西北地区干旱地区土壤水环境研究"(801813)
作者简介: 赵景波(1953—),男(汉族),山东省滕州市人,博导,教授,主要从事第四纪和区域环境学研究。E-mail: zhaojb@snnu.edu.cn。

性相关关系[1]。对古尔班通古特沙漠季节性冻土进行的研究认为, 沙漠内季节性冻土的稳渗率为非冻土的1/ 10左右, 约为 0. 24~ 0. 30 mm/ min, 沙漠冻结风沙土的稳渗率约为田间冻结壤土的 10~ 20 倍[2-3]。对毛乌素沙地的入渗研究认为, 人工柠条林的土壤入渗性能要优于无植被覆盖的沙地, 前 10 min 为迅速入渗阶段, 以后为缓慢入渗阶段[4]。也有研究显示沙漠地区降水对地下水的补给随地下水的深度增加而降低[5-6]; 当降雨量足够大时, 雨水可迅速下渗补给到地下水[4]。目前针对黄土的入渗研究是相当成熟的, 并取得了很多重要研究成果[7-9]。本文通过现场入渗试验, 揭示沙丘沙层渗透性, 为认识沙层水分入渗规律、沙层水分来源、沙漠区的水资源开发利用和生态建设提供依据。

1　研究区概况与研究方法

研究地区位于腾格里沙漠东南缘的中卫市沙坡头区境内, 试验地点在中国科学院风沙科学观测场内, 位于 37°33′27. 8″ N, 105°04′04″ E, 海拔 1 286 m, 距中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头试验站东北方向约 11 km。该地区沙丘高度一般在 5 ~ 30 m 之间, 地形地貌复杂, 多为链状新月形沙丘, 也有格状沙丘。沙漠区植物稀少, 在沙丘中下部或丘间低地生长有稀疏灌木与草本植物。该地区年均降雨量为 180 mm[10], 气温季节变化明显, 1 月最冷, 最低月平均气温为- 7. 7 ℃。7 月最热, 最高月平均气温为 27. 4 ℃[11]。属大陆性干旱气候区, 寒冷、干燥、多风。采用目前通用的双环入渗法[7-9, 12] 进行野外现场入渗试验。首先选定表面较为平整的地点, 地表没有细粒土的结皮, 将 2 个高 20 cm, 直径分别为 30 和 40 cm 的圆形铁环放置在待测点并将铁环下端插入沙层 5 cm, 然后在铁环内铺垫一层厚 3~ 5 cm 的细砾石, 以防止加水时冲击沙层而影响水的入渗。在铁环内 5 cm 高度处标注记号, 作为以后每次加水的标准刻度, 并向两环内同时加水至 5 cm 高度, 之后记录每 1 000 ml 水下渗所用的时间, 直到最后至少 3 次加相同量的水入渗时间相等即达到稳定入渗为止。

2　试验结果

2009 年 10 月 21 日, 我们在吊坡梁中国科学院风沙观测场选择了 9 个点进行沙层水分入渗试验, 在流动沙丘顶部、半固定沙丘顶部、沙丘间洼地分别设 3 个试验点。

2. 1　入渗试验结果

针对风沙观测场的 3 种不同地貌类型, 我们做了 3 组渗水试验, 每组包括 3 个不同试验点。根据实验结果, 我们将每个点的前 1 min 平均渗水率作为初渗率, 并按照初渗率、稳定前的平均入渗率、稳定入渗率和稳定前的累积入渗量进行入渗特点的介绍。

流动沙丘顶部入渗结果(图 1) 表明, 1 号试验点前 1 min 入渗率迅速减小, 初渗率为 35. 4 mm/ min。之后入渗率以较低值平稳下降, 经过约 6. 5 min 达到稳定入渗状态。稳定前的平均入渗率为 19. 2 mm/ min, 稳定入渗率为 14. 4 mm/ min, 稳定前的累积入渗量为 112 mm。2 号试验点前 1 min 入渗率变化较小, 初渗率为 45. 0 mm/ min。1 min 后入渗率逐渐下降, 经过约 6. 4 min 达到稳定入渗状态。稳定前的平均入渗率为 26. 4 mm/ min, 稳定入渗率为 15. 0 mm/ min, 稳定前的累积入渗量为 112 mm。3 号试验点前 1 min 入渗率较快, 初渗率为 39. 6 mm/ min。1 min 之后入渗率以较高值稳定下降, 经过约 6. 4 min 达到稳定入渗状态, 稳定前的平均入渗率为 29. 4 mm/ min, 稳定入渗率为 19. 2 mm/ min, 稳定前的累积入渗量为 168 mm。

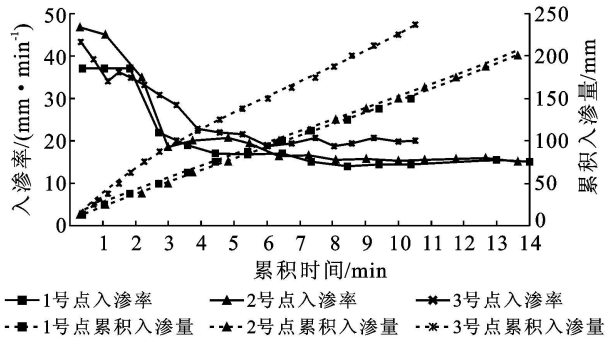


图 1　腾格里沙漠流动沙丘顶部入渗曲线

半固定沙丘顶部入渗结果(图 2) 表明, 4 号试验点前 1 min 入渗率迅速减小, 初渗率为 37. 8 mm/ min。1 min 之后入渗率以较低值稳定下降, 经过约 6. 4 min 达到稳定入渗状态。稳定前的平均入渗率为 24. 6 mm/ min, 稳定入渗率为 21. 0 mm/ min, 稳定前的累积入渗量为 154 mm。5 号试验点前 1 min 入渗率迅速减小, 初渗率为 36. 6 mm/ min。1 min 之后入渗率以较低值稳定下降, 经过约 7. 4 min 达到稳定入渗状态。稳定前的平均入渗率为 0. 38 mm/ min, 稳定入渗率为 0. 29 mm/ min, 稳定前的累积入渗量为 154 mm。6 号试验点前 1 min 入渗率迅速减小, 初渗率为 32. 4 mm/ min。1 min 之后入渗率以较低值稳定下降, 经过约 7. 3 min 达到稳定入渗状态。稳

定前的平均入渗率为 16.8 mm/min, 稳定入渗率为 12.6 mm/min, 稳定前的累积入渗量为 112 mm。

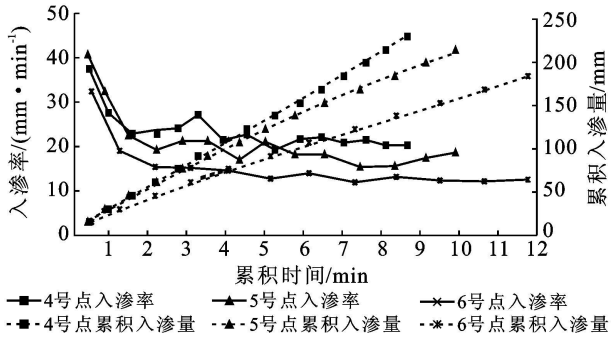


图 **2** 腾格里沙漠半固定沙丘顶部入渗曲线

沙丘间洼地入渗结果(图 3) 显示, 7 号试验点前 1 min 入渗率迅速下降, 初渗率为 20.4 mm/min。1 min 之后入渗率缓慢下降, 经过约 9.2 min 达到稳定入渗状态。稳定前的平均入渗率为 14.4 mm/min, 稳定入渗率为 13.2 mm/min, 稳定前的累积入渗量为 126 mm。8 号试验点前 1 min 入渗率迅速下降, 初渗率为 23.4 mm/min。之后入渗率缓慢下降, 经过约 8.7 min 达到稳定入渗状态。稳定前的平均入渗率为 13.8 mm/min, 稳定入渗率为 10.8 mm/min, 稳定前的累积入渗量为 112 mm。9 号试验点前 1 min 入渗率迅速下降, 初渗率为 25.2 mm/min。1 min 之后入渗率缓慢下降, 经过约 8.5 min 达到稳定入渗状态。稳定前的平均入渗率为 16.2 mm/min, 稳定入渗率为 12.0 mm/min, 稳定前的累积入渗量为 126 mm。

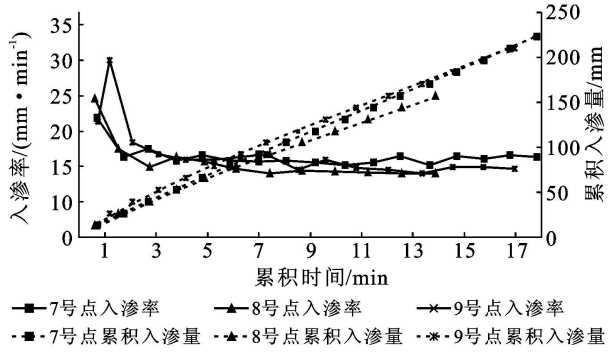


图 **3** 腾格里沙漠洼地入渗曲线

2.2 入渗试验结果的非线性回归分析

为了进一步研究分析腾格里沙漠东南缘的水分入渗情况, 我们将利用以下 3 种土壤入渗模型对入渗实验数据进行非线性回归分析。分析结果列在表 1 和表 2。

Koctakob 公式[9, 12]: $f(t) = at^{-b}$

式中: t ——入渗时间(min); a, b ——经验参数。

Horton 公式[9, 12]: $f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$

式中: f_0, f_c ——初渗率和稳定入渗率(mm/min); k ——经验参数; t ——入渗时间(min)。

通用经验公式[9]: $f(t) = a + bt^{-n}$

式中: a, b, n ——经验参数; t ——入渗时间(min)。

表 **1** 土壤入渗模型的分析结果

试验点	Koctakob 公式计算结果			Horton 公式计算结果				通用经验公式计算结果			
	a	b	R^2	f_c	f_0-f_c	k	R^2	a	b	n	R^2
1	1.415	0.303	0.898	0.200	0.400	0.010	0.829	0.223	9.933	1.040	0.991
2	2.220	0.336	0.848	0.300	0.400	0.007	0.778	0.342	6.201	0.037	0.843
3	1.648	0.259	0.894	0.300	0.400	0.010	0.808	0.256	6.735	0.267	0.881
4	1.012	0.180	0.793	0.400	0.200	0.019	0.512	0.337	5.518	0.946	0.876
5	1.509	0.277	0.899	0.300	0.300	0.010	0.805	0.238	3.687	0.692	0.937
6	1.394	0.316	0.908	0.200	0.300	0.009	0.856	0.194	9.117	1.004	0.992
7	0.448	0.113	0.553	0.200	0.100	0.004	0.478	0.218	13.397	1.805	0.864
8	0.884	0.253	0.871	0.200	0.200	0.011	0.824	0.175	9.636	1.062	0.968
9	1.035	0.255	0.644	0.200	0.200	0.006	0.643	0.075	1.247	0.355	0.646

注: a, b, n, k 均为经验参数; f_0 为初渗率; f_c 为稳定入渗率; R^2 为相关系数。下同。

从表 1, 2 可知, 流动沙丘的分析结果较好, 其次是半固定沙丘, 洼地最差。利用通用经验公式对流动沙丘的分析结果显示相关性系数(R^2) 较大, 但其参数(a, b) 标准差估值较大, 稳定性较差。利用 Koctakob 公式计算的结果显示相关性系数(R^2) 也较高, 参数(a, b) 标准差估值较小, 较为稳定。Horton 公式较前者的相关性系数(R^2) 低一些。半固定沙丘除 4 号实验点外, 其余分析结果与流动沙丘基本相同。洼地沙层除 8 号试验点较好外, 其余计算结果均较差。由此可见, Koctakob 公式较适用于该沙漠地区沙丘的水分入渗研究, a 值的变化范围较小(1.394~ 2.220), 这与该沙漠地区沙丘土壤表层的初始含水量和土壤容重有

关; b 值的变化范围也较小(0. 259~ 0. 336), 反映了沙漠地区沙丘水分入渗速率随时间增长而递减的状况, b 值越大, 入渗率随时间减小越快。该沙漠地区沙丘入渗的 Koctakob 公式经验参数估计值应取平均值 a= 1.637, b= 0. 298; Horton 公式次之, 参数估值应取平均值 k= 0. 009。

表 **2**　土壤入渗模型的相关参数标准差

样点	Koctakob 公式参数标准差		Horton 公式参数标准差	通用经验公式参数标准差		
	a	b	k	a	b	n
1	0.195	0.028	0.001	0.008	2.934	0.096
2	0.365	0.033	0.002	0.011	2.349	0.206
3	0.167	0.021	0.001	0.134	3.305	0.140
4	0.120	0.023	0.008	0.024	4.829	0.290
5	0.175	0.024	0.002	0.040	1.829	0.179
6	0.191	0.028	0.002	0.007	2.525	0.088
7	0.064	0.024	0.001	0.004	2.136	0.553
8	0.129	0.027	0.002	0.009	6.264	0.186
9	0.266	0.047	0.002	0.243	1.383	0.462

3　讨 论

3.1　沙丘入渗率的变化特点

根据试验结果, 我们得到 3 种地貌类型的平均初渗率、稳定前平均入渗率和平均稳定入渗率(图 4) 。流动沙丘的平均初渗率为 40. 2 mm/ min, 平均 6. 3 min 后达到稳定入渗状态, 稳定前的平均入渗率为 25. 2 mm/ min, 平均稳定入渗率为 16. 2 mm/ min。半固定沙丘的平均初渗率为 35. 4 mm/ min, 平均 7. 0 min 后达到稳定入渗状态, 稳定前的平均入渗率为 21. 6 mm/ min, 平均稳定入渗率为 16. 8 mm/ min。洼地沙层平均初渗率为 22. 8 mm/ min, 平均 8. 8 min 后达到稳定入渗状态, 稳定前的平均入渗率为 15. 0 mm/ min, 平均稳定入渗率为 12. 0 mm/ min。由图 4 可知, 3 种地貌类型的平均初渗率、稳定前平均入渗率和平均稳定入渗率均呈递减趋势, 半固定沙丘的稳定入渗率略大于流动沙丘, 洼地的稳定入渗率最小。

根据前人的研究, 水分入渗率随土壤初始含水量的增加而减小[13]; 植被周围土壤稳定入渗率随距植被距离的增加而下降[3, 14-15]。所以我们测定了表层 40 cm 沙层含水量, 结果表明流动沙丘沙层平均含水量为 3. 2%, 半固定沙丘沙层平均含水量为 3. 1%, 洼地沙层平均含水量为 4. 2%。半固定沙丘植被为旱生芦苇, 长势较好, 高度在 60 cm 上下, 植被盖度在 30% 左右, 不存在结皮。可见, 植被和沙层初始含水量是影响沙层入渗率的重要因素。

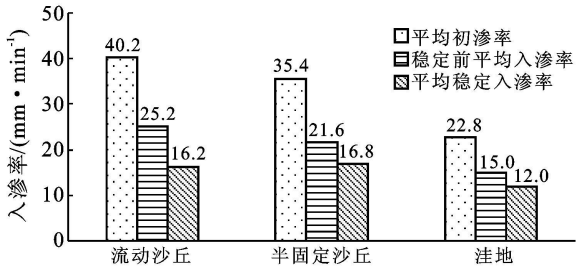


图 **4**　不同地貌的平均入渗率对比

3.2　沙层渗透性与黄土渗透性的对比

为了进一步研究沙丘的入渗特点, 我们将沙丘的入渗率与 L_1—L_5 层黄土[9] 的入渗率作对比。L_1—L_5 层黄土达到稳定入渗的时间一般为 80~ 140 min, 其初渗率分别为 6. 0, 9. 0, 1. 8, 4. 8, 3. 6 mm/ min, 稳定前的平均入渗率分别为 1. 8, 4. 2, 0. 6, 3. 0, 2. 4 mm/ min, 稳定入渗率分别为 1. 2, 2. 4, 0. 6, 1. 8, 1. 8 mm/ min。不同地貌类型下沙层达到稳定入渗的时间为 6. 0~ 9. 2 min, 比黄土达到稳定入渗要快 11 倍以上。图 4 中入渗率最小的洼地沙层与入渗率最大的黄土 L_2 层相比, 初渗率高出 L_2 土层 2. 5 倍, 稳定前的平均入渗率高 3. 6 倍以上, 稳定入渗率高 5. 0 倍(表 3) 。因此, 沙层入渗具有入渗率高, 达到稳定入渗快的特点。

表 **3**　沙层与黄土稳定入渗率对比($V_{风沙土}/V_{黄土}$)

项 目	V_{L1}	V_{L2}	V_{L3}	V_{L4}	V_{L5}
$V_{流动}$	13.5	6.8	27.0	9.0	9.0
$V_{半固定}$	14.0	7.0	28.0	9.3	9.3
$V_{洼地}$	10.0	5.0	20.0	6.6	6.6

注: $V_{流动}$, $V_{半固定}$, $V_{洼地}$ 为 3 种风沙土的稳定入渗率; V_{L1-L5} 分别为 L_1—L_5 层黄土的稳定入渗速率; $V_{风沙土}/V_{黄土}$ 为风沙土稳定入渗率相对于黄土稳定入渗率的比。

不同类型或地形条件下的土壤入渗率的变化量不同。流动沙丘入渗率的变化量为 59. 7%, 半固定沙丘入渗率的变化量为 52. 5%, 洼地的入渗率的变化量为 47. 4%; L_1—L_5 黄土层的入渗率的变化量分别为 80%, 73. 3%, 66. 7%, 62. 5%, 50. 0%。总体上看, 黄土的入渗率要比沙漠沙层入渗率的变化量大。

稳定前的累积入渗量可以反映土壤入渗能力[16]。为揭示沙丘入渗量与入渗速率和入渗时间的关系我们根据试验结果绘制了沙层累积入渗量随时间变化曲线(图 1—3) 。从图 1—3 中可以看出, 流动沙丘到半固定沙丘再到洼地, 入渗率曲线在稳定前的曲率由低变高, 达到稳定后曲线曲率接近 0。流动沙丘、半固定沙丘、洼地前 8. 8 min 累积入渗量分别为 173, 173,

121 mm。由此可以断定, 流动沙丘与半固定沙丘入渗量基本相同, 入渗能力均较大; 洼地的入渗能力较低。根据过去的研究[9], 黄土 L_1—L_5 层前 8.8 min 累积入渗量分别为 15.84, 36.96, 5.28, 26.4, 21.12 mm。可见, 沙层的入渗能力要比黄土高出 4 倍以上。

3.3 沙层入渗快的原因和对大气降水转化的作用

根据前人的研究, 古尔班通古特沙漠南缘沙地沙垄顶部的稳定入渗率变化在 5.4~ 9.0 mm/ min 之间, 沙垄间变化在 1.2~ 2.4 mm/ min 之间[3]。与之相比, 腾格里沙漠东南缘的沙层稳定入渗率变化在 12.0~ 16.8 mm/ min 之间, 较古尔班通古特沙漠南缘沙地其沙垄顶部最大入渗率至少大 1 倍。前人对古尔班通古特沙漠沙丘粒度研究表明, 沙层中黏土占 0.71%~ 3.87%, 粉沙占 2.81%~ 17.36%, 极细沙—细沙占 58.74%~ 71.31%, 中沙—极粗沙占 14.21%~ 37.74%[17]。对腾格里沙漠沙丘粒度研究认为, 细沙占 60.5%~ 66.2%, 中沙占 14.5%~ 22.5%, 极细沙占 16.6%~ 18.9%, 粉沙及黏土含量甚微, 不含粗沙[18-19]。沙层粒度成分对入渗率有很大影响[14], 沙丘粒度成分较粗入渗率较高, 沙丘粒度成分较细入渗率较低, 随粘粒含量增多, 入渗能力递减[20]。上述粒度分析结果显示, 腾格里沙漠粒度成分以细沙为主, 而古尔班通古特沙漠沙丘粒度成分以极细沙为主, 显然前者比后者粒度成分粗, 这就造成了腾格里沙漠沙层入渗率比古尔班通古特沙漠沙层入渗率高。

如上所述, 黄土达到稳定入渗的时间较长, 黄土的入渗率较小, 入渗率变化量却较大。将沙层粒度组成、结构与黄土相比, 黄土结构较为复杂, 具有团粒状和团块状结构, 大孔隙发育, 孔隙度介于 53%~ 40% 之间; 物质组成中黏粒占 25%~ 30%, 粉沙占 60%~ 65%, 沙粒占 8%~ 10%[21]。由此可以认为沙层粒度成分较为均一, 粒度较粗, 孔隙连通性好, 是其达到稳定时间短、入渗率变化小的重要原因。

试验结果表明, 沙层具有水分快速入渗的特点, 这非常有利于大气降水向地下水的转化。在细粒土层中, 由于入渗缓慢, 大气降水在土壤表层易于蒸发, 使得大气降水向地下水的转变量减少。资料显示, 腾格里沙漠平坦和低洼地段地下潜水位埋深约 1.23~ 4.0 m[22-23]。该区较为丰富的地下水资源除了降水量较多的作用之外, 沙层水分的快速入渗加速了大气降水对地下水的补给。另外, 沙层水分受蒸发作用影响深度小也是很重要的因素[24]。

4 结 论

(1) 在稳定前, 流动沙丘入渗率最大, 半固定沙丘次之、洼地最小。在稳定后, 半固定沙丘的入渗率较流动沙丘略大, 洼地则最小, 它们的稳定入渗率分别为 16.8, 16.2, 12.0 mm/ min。流动沙丘与半固定沙丘水分入渗量基本相同, 入渗量均较大, 洼地入渗量最小。

(2) 沙层具有水分入渗率高, 达到稳定入渗快和入渗率变化小的特点。沙层物质较为均一, 粒度较粗和孔隙连通性好, 是沙层水分入渗率高, 达到稳定入渗快和入渗率变化小的主要原因。不同地貌类型的沙层达到稳定入渗的时间在 6.3~ 8.8 min 之间。

(3) 在常用的 3 个入渗计算公式中, Koctakob 公式最适用于沙丘水分的入渗研究, Horton 公式次之, 通用经验公式不适于沙丘水分入渗研究。

(4) 腾格里沙漠地下水资源较为丰富, 这除了与该沙漠降水量较一般沙漠偏多起到了主要作用之外, 沙层水分入渗快和沙层受蒸发作用影响深度小也是该区地下水较丰富的重要因素。

[参 考 文 献]

[1] 王新平, 李新荣, 康尔泗, 等. 腾格里沙漠东南缘人工植被区降水入渗与再分配规律研究[J]. 生态学报, 2003, 23(6): 1234-1241.

[2] 周宏飞, 周宝佳, 汤英, 等. 古尔班通古特沙漠季节性冻土入渗特性试验研究[J]. 干旱区地理, 2009, 32(4): 532-536.

[3] 周宏飞, 汤英, 周宝佳. 荒漠灌木及冻融影响下的风沙土入渗特征[C]// 土壤资源持续利用与生态环境安全学术会议论文集. 广东 广州: 中国土壤学会, 2009: 199-206.

[4] 张强, 孙向阳, 黄利江, 等. 毛乌素沙地土壤水分特征曲线和入渗性能的研究[J]. 林业科学研究, 2004, 17(S): 9-14.

[5] 王学全, 高前兆. 塔克拉玛干沙漠降水入渗和径流补给试验观测[J]. 干旱区资源与环境, 1998, 12(4): 112-118.

[6] 张建山, 仵彦卿, 李哲. 陕北沙漠滩区降水入渗与凝结水补给机理试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 15(5): 124-126.

[7] 蒋定生, 黄国俊. 黄土高原土壤人渗速率的研究[J]. 土壤学报, 1986, 23(4): 299-305.

[8] 陈丽华, 余新晓. 晋西黄土地区水土保持林地土壤入渗性能的研究[J]. 北京林业大学学报, 1995, 17(1): 42-47.

[9] 赵景波, 邵天杰, 牛俊杰. 西安白鹿塬黄土渗透性与含水条件[J]. 地理研究, 2009, 28(5): 1188-1196.

[10] 王新平, 张景光, 李新荣, 等. 沙坡头地区多年降水分布特征、趋势及其变率[J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 260-264.

[11] 吕萍, 董治宝, 张正偲, 等. 腾格里沙漠近地面层风、气温、湿度特征[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 977-981.

(下转第 70 页)

越来越弱, 一旦受强暴雨作用, 土壤冲刷加剧, 土壤流失率成倍增加。上述天气要素瞬时效应的长期不断叠加, 导致基本无土可流, 形成基岩裸露的石漠景观。虽然平均春旱日数、最长春旱日数、平均夏旱日数、最长夏旱日数、平均凝冻日数、最长凝冻日数与石漠化无法通过相关性检验, 但对气候要素对石漠化发生发展的驱动机制还需要更加深入细致的研究。在深入研究石漠化演变规律及其制定减缓石漠化进程的气象对策过程中, 必须加强石漠化天气、气候效应及气象灾害影响的研究。

不同地区由于气候、地质土壤、石漠化程度以及人为干扰程度的不同而不同。人类活动对植被的破坏一直在持续。灌木砍伐后, 残留于土中的根茎仍然能够生长, 可农业生产对自然植被的破坏则是毁灭性的。人类活动的作用表现为使非易受侵蚀体转换为易受侵蚀体, 为原本不具备侵蚀条件的地区创造侵蚀条件, 并且由于人类活动导致气候变化, 极端天气事件增加, 暴雨几率增大, 加剧了侵蚀的发展。

[参 考 文 献]

[1] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101-104.

[2] 王德炉. 喀斯特石漠化的形成过程及防治研究[D]. 江苏南京: 南京林业大学, 2003.

[3] 李瑞玲. 贵州岩溶地区土地石漠化形成的自然背景及其空间地域分异[D]. 贵州 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2004.

[4] 袁春, 周常萍, 童立强. 贵州土地石漠化的形成原因及其治理对策[J]. 现代地质, 2003, 17(2): 181-185.

[5] 李阳兵, 王世杰, 谭秋, 等. 喀斯特石漠化的研究现状与存在的问题[J]. 地球与环境, 2006, 34(3): 9-14.

[6] 路洪海, 冯绍国. 贵州喀斯特地区石漠化成因分析[J]. 四川师范学院学报: 自然科学版, 2002, 23(2): 189-191, 212.

[7] 熊康宁, 黎平. 喀斯特石漠化的遥感: GIS 典型研究[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 168-182.

[8] 廖赤眉. 广西喀斯特地区土地石漠化与生态重建模式研究[M]. 北京: 商务印书馆, 2006: 21-231.

[9] 陈美球, 刘序. 鄱阳湖地区土地利用格局变化驱动力分析[J]. 安徽农业大学学报, 2006, 33(1): 123-129.

[10] 索安宁, 巨天珍, 熊友才, 等. 泾河流域土地利用区域分异与驱动力的关系[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(6): 75-80.

[11] 贵州省统计局. 贵州统计年鉴 2001[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001: 389-654.

[12] 贵州省统计局. 贵州年鉴 2001[M]. 贵州 贵阳: 贵州统计出版社, 2001: 423-685.

[13] 何勇, 董文杰, 季劲均, 等. 基于 AVIM 的中国陆地生态系统净初级生产力模拟[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 345-349.

[14] 谷晓平, 黄玫, 季劲钧, 等. 近 20 年气候变化对西南森林净初级生产力的影响[J]. 自然资源学报, 2007, 22(2): 251-259.

[15] 吴战平, 许丹. 贵州气候变化的科学事实[J]. 贵州气象, 2007, 31(4): 3-4.

(上接第 16 页)

[12] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 126-133.

[13] 曾辰, 王全九, 樊军. 初始含水率对土壤垂直线源入渗特征的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 24-30.

[14] 汤英, 周宏飞, 徐利岗. 荒漠植被影响下的沙地稳定入渗率变化特征[J]. 土壤通报, 2009, 40(2): 235-239.

[15] 徐丽恒, 王继和, 李毅, 等. 腾格里沙漠南缘沙漠化逆转过程中的土壤物理性质变化特征[J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 690-695.

[16] 杨素宜. 土壤含水量对浑水入渗能力的影响[J]. 太原大学学报, 2010, 11(2): 127-130.

[17] 钱一兵, 吴兆宁, 杨海峰, 等. 古尔班通古特沙漠南部风沙土粒度分布的空间异质性[J]. 干旱区地理, 2009, 32(5): 655-660.

[18] 哈斯. 腾格里沙漠东南缘格状沙丘粒度特征与成因探讨[J]. 地理研究, 1998, 17(2): 178-184.

[19] 哈斯, 王贵勇. 沙坡头地区新月形沙丘粒度特征[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 271-275.

[20] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 不同黏粒含量土壤水分入渗能力模拟试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 71-77.

[21] 徐芹选, 赵景波, 祁晓丽. 黄土孔隙度及粒度组成关系初探[J]. 西安工程学院学报, 2000, 22(1): 67-701.

[22] 刘元波, 陈荷生, 高前兆, 等. 沙地降雨人渗水分动态[J]. 中国沙漠, 1995, 15(2): 143-150.

[23] 谭增任, 周兴智. 腾格里沙漠地下水及西部富水带的开发问题[J]. 水文, 1985(4): 16-22.

[24] 冯起, 程国栋. 我国沙地水分分布状况及其意义[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 225-236.